SoilSense:土壌微生物燃料電池を用いた自発電型 タンジブルユーザインタフェースの構築

塚越雄真^{1,a)} Tian Min^{1,b)} 杉浦裕太^{1,c)}

概要:近年気候変動対策として持続可能なエネルギの需要が高まっている. この課題に対し水分のみで作 動する土壌微生物燃料電池 (Soil-based Microbial Fuel Cells, SMFC) が持続可能なエネルギの代替源とし て注目を集めている. これは,土壌中の微生物の代謝活動を通じて電力を生成するものである.本研究で は,SMFC を柔軟な力覚センサとして活用するための新たなデザインスペースを提案する.カソードと土 壌表面の接触面積の変化によって生じる電圧変動を利用し,土壌を様々な環境に適用可能な「ユビキタス なセンサ素材」として導入する. このアプローチにより,静電容量センサや力センサに類似したセンシン グ機能を実現する. 私たちは,さまざまな電極構成および体積含水率 (VWC) におけるこの現象の基本原 理を調査した.また,多様な入力に対応するため,柔軟な素材を用いたモジュール型のコンテナを設計・ 製作した.さらに,SMFC を用いたユーザシナリオを実証し,バイオデザインとして土壌を使用する際の 設計上の考慮点について結論を示す.

1. はじめに

自然界に広がる土壌は、微生物学 [1], [2]、農業 [3], [4], 再生可能エネルギ [5], [6] などの多様な分野で注目されてい る. SMFC は、農地や湿地、地下環境において持続可能な エネルギ源として有望視されている.アノードを土壌内, カソードを土壌表面に設置することで、微生物の代謝によ り有機物から電力を生成できる.実験では、最大 731mV の電圧と 200µW の電力を発生することが確認されてい る [7], [8]. しかし, 現実の環境では, 出力が不安定であり, 水分や土壌成分の変動に大きく影響を受ける [5], [9]. これ までの SMFC の研究は安定したエネルギ生成に主眼を置 いていたが、土壌をインタラクションの要素として活用す る可能性は十分に探求されていない.近年,HCI(ヒュー マン・コンピュータ・インタラクション)の分野では、自 然と協働する技術の可能性が注目されている [1], [2], [10]. 本研究では、SMFC をエネルギ源にとどまらず、インタラ クションに応答する動的要素として再解釈することで、新 たな設計空間を開拓することを目指す. 主要な実験では、 カソードに圧力を加えると,土壌表面との接触面積が変化 し、それに伴い電圧出力が増減することを確認した.特に 強い圧力を加えた場合, 電圧が顕著に上昇し, 力覚センサ

として機能することが示された.また,柔軟な土壌コンテ ナとモジュール設計を活用し,土壌の変形をセンサ信号に 変換することで,追加のハードウェアを必要とせず,土壌 を基盤とした柔軟なインタフェースを実現した.この技術 は,バイオデザインや自然と調和したインタラクションの 新たな可能性を提供するものである.

本研究の貢献を以下に示す.

- 各種電極構成および水分条件の下で、圧力と電圧変化の関係を検証した。
- 土壌ベースのインタラクションを可能にするソフトコンテナを設計し、「押圧」、「屈曲」、「捻り」のジェスチャを識別するセンサモードを開発した。
- 土壌センシング技術が提供する新しい体験や従来技術の改善に貢献する応用例をいくつか紹介し、本技術の可能性と課題について議論した。

2. 関連研究

2.1 土壤微生物燃料電池

2.1.1 電極および酸化還元反応

カーボンフェルトは,その高い比表面積,耐久性,手頃 な価格,環境への低負荷といった特性から SMFC の電極 として広く使用されている [5].アノードとして使用する 場合,多孔質構造が微生物のバイオフィルムの成長を促進 する.一方,カソードとして使用する場合,その透過性が 酸素の還元反応を効率化する [11], [12].しかし,過電位や

¹ 慶應義塾大学

 $^{^{\}rm a)}$ tsukakoshi.yuuma.0910@keio.jp

^{b)} welkinmin@keio.jp

 $^{^{\}rm c)}$ sugiura@keio.jp



図 1 カソードに圧力が加わると SMFC の出力電圧が力に応じて変化するため、土を力覚セン サとして使用することで、(b) 押圧、(c) 屈曲、(d) 捻りという動作に反応する触覚イン タフェースを作成でき、様々なインタラクションデザインへの応用が可能となる.

オーム損失, 質量輸送の制約により, カソード反応がボト ルネックとなり, MFC の出力が制限される [13], [14]. 従 来の SMFC の研究は主にエネルギ生成や環境モニタリン グに焦点を当てていたが,本研究では電圧変動を用いた力 センシングに応用しリアルタイムなインタラクションを可 能にする点で新規性を持つ.

2.1.2 SMFC の性能に影響を与える環境要因

SMFC の性能は, 土壌中の微生物活動に依存し, 温度, 湿 度, 土壌組成, pH などの環境要因に敏感である [15], [16]. 特に, 温度 [16], 体積含水率(VWC)[17], 土壌有機物の 含有量 [18] が出力に正の相関をもたらすことが確認されて いる.

2.2 バイオデザイン

生物をコンピューティングシステムに統合する研究は, センシング技術の開発 [19], インタラクションの探求 [20], 農業やガーデニングへの応用 [21], [22] など多岐にわたる. 微生物や植物は土壌環境と密接に関わり,新たなデザイン の可能性を提供する. 植物とのインタラクションにおいて, 成長や水分変化を入力とする場合,反応速度が制約となり リアルタイムでの利用が難しい [10]. オジギソウやハエト リソウなど,一部の植物はリアルタイムの反応が可能で, インタラクション研究の対象となっている [23], [24]. 微生 物は単純な生物プロセスを持ち,外部刺激に迅速に反応す る能力を有する [25], [26]. さらに,微生物の成長パターン や色変化を用いた視覚的表現が可能であり [27], [28],ケ アベースのインタラクションデザインにも応用されてい る [29]. 従来のバイオデザインが植物や微生物の生理的反



CH₃COO⁻ + 3H₂O → CO₂ + HCO₃⁻ + 8H⁺ + 8e⁻ (Anaerobic Oxidation Reaction)

図 2 SMFC の模式図

応に基づくのに対し,本研究は SMFC を用いて「力の変動」をセンシングする新しい方向性を提案し従来の植物 ベースのセンシングが持つ反応速度の制約を克服する.

2.3 力センシング

カセンシング技術には, 圧電抵抗型 [30], [31], 圧電型 [32], 静電容量型 [32],および材料変形に基づく方式 [33], [34] がある.これらの技術は、センシング精度、製造の容易 さ、エネルギ消費の間でトレードオフを伴う.たとえば、 ForceSight[33] はレーザーによる非接触型センシングを提 供し, ForceSticker[35] は RFID を用いて微小な力の変動 を検出する. SoilSense は, SMFC を基盤とした新たな力 センシング技術であり、製造が容易で、資源とエネルギ効 率に優れている. 従来の電子部品や圧電フィルムと異な り,使用する土壌は100%リサイクル可能であり,カーボ ンフェルトも繰り返し利用できる.また, SoilSense は連続 放電が可能であり、アイドル時には他のセンサへ電力供給 も行える.本研究では、SMFC を利用した持続可能な力セ ンシング技術を提案する.既存の力センサーと比べ、環境 負荷を低減しながらセンシングを可能にする点で優位性が ある. このような特性により、バイオデザインシステムや グリーンインフラの文脈での応用が期待される [36], [37].





3. 土壌センシング技術

3.1 実験設定

カソードにかかる力と電圧変動の関係を調べるため,土 壌ベースの力センシングの基本原理を確認する一連の実 験を行った.実験は室温(約25°C)の環境下で実施し た.使用した土壌はキャンパス内の庭から収集したもの で,2mmのメッシュでふるい,大きな粒子や昆虫などの 異物を除去した.土壌は容器に入れる前に水で湿らせ,均 一な混合物にするため十分に撹拌した.

VWC (体積含水率) 50%, 70%, 90%の 3 種類の SMFC を準備し, それぞれの土壌を 1 辺 100mm の立方体容器に 入れた. 土壌内の嫌気性環境を確保するため, SMFC は実 験開始の 48 時間前にセットし,安定したエネルギ出力レ ベルに達するまで放置した.

図4には、実験に使用した機器が示されている.LOKIH 製の厚さ5mmのカーボンフェルト電極[38]を使用し、電 極間の距離は約80mmに設定した.また、45mmと90mm の2種類の正方形電極を用いた.外部回路には2kΩの 抵抗を挿入し、銅線とステンレス製ワニロクリップで接 続した[39].出力電圧と電流はデジタルマルチメーター で監視し、ミリボルトおよびミリアンペア単位で測定し た.VWCの監視には4つの土壌湿度センサ(DiyStudio A3012656JP)を使用した.カソードに特定の力を加える ため、IMADA 製のデジタルフォースゲージとMX2シリー ズの垂直モーター付き試験台を使用した.力を均等に加え るため、フォースゲージのプローブには3Dプリントした アタッチメントを装着した.

3.2 電極サイズと VWC

エネルギ出力と電極サイズおよび VWC との関係を調 べるために、2つの予備実験を行った.最初の実験では、 図 5 (a) に示すように、固定された VWC の下で異なる電 極サイズのエネルギ出力を記録した.カソードの面積が 大きいほど高い出力が得られる一方で、アノードのサイ ズには明確な相関が見られなかった.2つ目の実験では、 VWC のレベルが 90%、70%、50%の場合における 32 時間 の間の出力電圧を測定した(図 5 (b)).実験結果は先行研 究 [5], [16], [17] と概ね一致し、エネルギ出力はカソードの 面積と VWC に正の相関があることが示された.

3.3 土壌ベースの力センシングの原理

土壌は多孔質構造を持ち,圧力が加わるとわずかに圧 縮される性質がある [40].この効果は、微粒子を多く含む 高湿度の土壌で顕著であり、外力によって粒子が再配置さ れる SMFC の特性と一致する [41].土壌表面に配置された カソードに圧力が加わると、カソードに圧力が加わると、 土壌にわずかに沈み込み、接触面積が増加する(図 6).ま た,カーボンフェルトの柔らかい構造が土壌に圧縮され, 細孔が収縮することで,還元反応の効率が向上し,出力電 圧が上昇する [42], [43].しかし,過剰な圧力はカソードや 土壌の不可逆的な変形を引き起こし,センサの機能が損な われる可能性がある.

3.4 カソードに加えられる力との関係

3.4.1 増加する力の適用

VWC約90%の状態で,45mmと90mmの2種類のカ ソードを用い,圧力と出力電圧の関係を調査した.モー ター付き試験台を使い,10mm/分の速度でカソードに力を 加え,200Nで停止させてから元の位置に戻した.図7に示 すように,大きいカソードでは電圧が急速に上昇し,200N でほぼ倍増した.圧力が解放されると,電圧は約1分で元 の値に戻り,90mmカソードの方が回復が早かった.

その後,45mmのSMFCを使用し,VWC90%,70%,50% の条件で同様の実験を行った.VWCが高いほど圧力に対 する電圧応答が大きく,90%の条件では200Nで急速に電 圧が上昇した(図8の90%サンプル).一方で,VWC50% の条件では導電性が低く,電圧応答が不安定であった.

3.4.2 持続的な力の適用

土壌の圧縮性により、力を持続的に適用すると時間の経 過とともに構造が変化し、電圧が減少する [40]. 10N から 200N まで段階的に力を加え、それぞれ 1 分間固定して電 圧の変化を測定した. 図 9(b) に示すように、両サイズのカ ソードで電圧は徐々に減少し、1 分後には元の値の 50%か ら 80%まで低下した. 45mm のカソードでは電圧の減少が 不安定であり、大きな変動が見られた.

4. SoilSense インタフェース

SMFC はカソードに加わる圧力に応じて反応するが,こ の機能をインタフェースやインタラクティブシステムに応 用する方法は未解決の課題である.また,SMFC は湿潤環 境での動作が必要であり,ユーザがカーボンフェルトや土 壌に直接触れることは実用的でない.しかし,土壌の可塑 性によってあらゆる形状の容器に適用可能であり,デザイ ンの柔軟性を高めることができる.たとえば,柔軟な素材 や硬質な素材を用いた容器により,力の伝達方法を変える ことが可能である.また,複数のカソードや SMFC を組み 合わせることで,センサデータの次元を拡張できる.

現時点では,SMFC 単体での自己発電による駆動は困難 である.そのため,本研究では複数の SMFC を昇圧コン バータを用いて効率的に蓄電し,蓄えた電力をインタラク ションのために供給することを想定している.

SoilSense のさまざまなセンサモードを実証するために, 熱可塑性ポリウレタン (TPU)を使用して,土壌の変形を 妨げない柔軟な容器を作成した.一方,硬質フィラメント



(a) SMFC Container

(b) Electrodes

(c) Moisture Sensor

図4 実験で使用した機器および材料

(d) Digital Multimeter

(e) Force Gauge



図 5 (a) 電極サイズの変化と (b) 土壌の体積含水率 (VWC) にお ける SMFC の出力電圧



図6 圧力を加えた際に、カーボンフェルト製カソードが土との接触 面積を変える様子

で作られた蓋は、力を効果的に伝達し、力が加わった際に カソードが突出しないように土壌表面と密接に接触させる. このような容器では、蓋が曲げやねじりの力をカソードに 加わる下向きの圧力に変換する.一方,柔軟な容器は土壌 が変形して上方に押し出され、カソードとの接触が密にな るように設計されている.図10に示すように,異なるイ ンタラクションを実現するため、2種類の容器と蓋を組み 合わせた. (a) は押圧・屈曲形状, (b) は捻り形状, (c) は 押圧・捻りの両方に対応できる構造, (d) はカソードが接 触しないよう中央に仕切りを設けたものである.



図 7 a) 45mm, (b) 90mm の異なるカソードサイズを持つ 2 つの SMFC で、カソードに加えた力と電圧の関係



図8 固定されたカソード面積 (45mm)の下で、体積含水率 (VWC) が 90%, 70%, 50%の 3 つの場合における出力電圧と圧力の 関係

4.1 センサモード

4.1.1 押圧

セクション 3.4 で使用したのと同じ力測定装置を使用し、 力を均等に分配するために硬質プレートをフォースゲージ



 図 9 (a) 45mm, (b) 90mm の異なるカソードサイズを持つ 2 つの SMFC に持続的な力を加えた際の電圧変化

に取り付けた. 50mm の容器は手持ちのインタラクション に適しており,最大 30N の圧力でテストを行った.先行 研究では,つまむ力や押圧力が 100N を超えることはまれ であり,これらの値はインタラクションの評価に適してい る [44], [45]. 結果は図 11(b) に記録されている.

4.1.2 捻り

蓋のねじり角度を測定するため、カメラを装置の真上に 配置し、蓋に取り付けたマーカの回転変位を記録した. ビ デオのタイムスタンプと電圧データを同期させ、特定のね じり角度での電圧を取得した. 容器は時計回りの回転のみ を対象とした(図11(c)). 容器がねじれると、内容器内部 の土壌が圧縮されて体積が減少し、上向きの力が発生して 電圧変化が生じた. 結果は図11(d)に示されている.

4.1.3 屈曲

複数のカソードを1つのアノードと共有するように容器 に設置することで,方向性のある力の検出が可能になる. 図 11(e) に示すように中央に仕切りのある蓋は,カソード 間の電圧変化を相対的に示す.仕切りがない場合,電圧の 差異は0である.蓋の左右に加わる力によって,2つのカ ソード間に異なる電圧変化が生じ,加圧された側の電極で より大きな電圧が観察される(図 11(f) および (g)).

4.2 配線とエナジーハーベスティングのテスト

SoilSense は、材料の変形による抵抗変化を利用したセンサではなく、従来の SMFC と同様の配線方法を使用す

る [7], [8]. ワニロクリップや金属線を電極に挿入して接続 する. 図 12(a) では,容器内に 2 つのカソードを配置し, 曲げセンサモードを実現している. 各カソードは負荷に接 続され,アノードが回路を完成させる. 多くのマイクロコ ントローラでは,ADC (アナログ・デジタル・コンバータ) の解像度や基準電圧の不安定さにより,測定値が不正確に なる可能性がある. この問題を解決するため,負荷抵抗を 増加させて測定電圧を増幅し,小さな圧力でも識別が容易 になるようにする. これにより,しきい値検出や複数信号 の比較が改善される. エナジーハーベスティングのテスト には ADP5090-2-EVALZ を使用した. 単一セルと 3 つの セルを直列に接続し,100mF のコンデンサに充電した. 図 12 (b) では,20 時間にわたるキャパシタの電圧の増加を記 録している.

5. 利用シナリオ

本研究は、SoilSense をセンシング技術として探求するも のである. 土壌がインタラクションの媒介として機能し、 ユーザやアプリケーションがその意義を付与する. 本セク ションでは、SoilSense のセンシング機能を応用した 4 つ の潜在的なシナリオを紹介する. また、これらの応用から 設計空間を探り、関連分野における将来の研究への洞察を 提供する.

5.1 土壌インタフェース

カソードに圧力が加わると、電圧の応答は迅速でリアル タイムである.この特性を利用し、タップや長押しを検出 する土壌ベースのコントローラを構築できる.モジュール 化されたボタンは、さまざまなシステムに組み込むことが 可能である.図13(a)のデモンストレーションでは、シリ コンパッドを取り付けた3つのセルを使用し、電圧のしき い値を基にゲームを制御するボタンを設計した.このよう な離散入力に加え、連続入力も多様なインタフェース操作 に応用できる.

5.2 様々な容器でのインタラクションの実現

土壌の高い可塑性により,容器の形状や構造に応じた多様なインタフェースが設計できる. MudWatt という教育 用おもちゃ [46] に着想を得て,動物の形状をした容器を 3 つ設計した.各容器に圧力が加わると,対応する動物の画 像と発音がスクリーンに表示される (図 13(b)).

5.3 人間と植物のインタラクションにおける入力

植物と人間のインタラクションにおいては,光,湿気, 振動,触覚などが一般的な刺激である [10]. これらの刺激 に対する植物の反応は「屈性」と呼ばれ,刺激の方向に向 かうか,あるいは逆方向に成長する現象である.しかし,



図 10 (a) (b) 2 種類の容器に, (c) (d) 2 種類の蓋を組み合わせることで, 押圧, 捻り, 屈曲 などのインタラクションを実現



図 11 (a) 均等に力を加える場合や, (c) 蓋を捻る場合の (b) 電圧と圧力の関係,および (d) 電圧と回転角度の関係/中央に仕切りがある蓋の左右に圧力を加えた場合の電圧の変化 (e) 左側と (f) 右側の電極の電圧が示される(白い矢印は力を示す)

植物の反応速度は遅く,刺激と反応の間に時間的なズレが 生じることが多い [47]. 土壌は植物エコシステムの重要な 構成要素であり, SoilSense はこのようなインタラクション の入力手段として適している.図13(c) に示すように,鉢 植えに簡単な SMFC を設置し,土壌表面にカソードとし てカーボンフェルトの小片を接続した.ユーザがこの領域 を押すと,湿度レベルなどの土壌情報がメッセージを通じ てユーザに送信される.このように,植物と土壌を一体の デザイン要素と見なすことで,より豊かなインタラクショ ンが可能になる.

5.4 地表面の圧力検出技術

SMFC は環境変数に敏感であるが, SoilSense の力センシ ング技術は屋外での応用の可能性を持っている.図 13(d) に示すように,屋外に設置された SMFC は,人間の体重に よる圧力を検出し,適切な電圧しきい値を設定することで, 通過する人の数を記録するトリガとして機能する.このよ うな構造は,芝生のような表面を歩く人の数を記録するた めに利用可能である.この例は概念実証として機能するが, 実際の展開に向けてスケーラブルな地面センサモジュール を作成するためにさらなる調査と設計が必要である.

6. SoilSense の設計における示唆

SMFC の特徴である構築の容易さ,エネルギ収集能力, そして本研究で提案された力センシング能力は,SoilSense を土壌ベースの力センサとしての可能性を高める要素で ある.しかし,SoilSense には限界があり,それは SMFC 技術の制約に関連している.具体的には,十分な体積含水



(a) Schematic Diagram

(b) Voltage Increment in Capacitor for Different Number of Cells



図 12 (a)Section 4.1.3 の設置図 (b) 100mF コンデンサを単一セ ルと 3 セルで充電した際の電圧



図 13 (a)「スペースインベーダー」ゲームを操作するボタン,(b) 押すと対応する画像が表示される土と電極を埋め込んだ動物 モデル,(c)触ると土壌の水分量を通知する植物,(d)通過す る人の数を記録する芝生

率(VWC)やアノードの嫌気性環境など,SMFCの基本 的な機能に依存している.また,SMFCを収容する容器 の形状や機能的特性,およびインタラクティブな特性が, SoilSenseの利用シナリオや新たなインタラクションパラ ダイムを定義する要因となる.

6.1 柔らかい容器の使用

柔軟な材料で作られた容器は、土壌の柔らかい特性に適 しているが、インタラクション中に SMFC の性能低下を引 き起こす可能性がある.他の柔軟なインタフェースとは異 なり、SoilSense は複雑なインタラクション(圧縮、剪断、 ねじりなど)に対応するよりも、カソードに垂直に加えら れる力を検出するのに適している.柔らかい容器に横方向 の力が作用すると、電極間に空洞が形成され、アノード周 辺の嫌気性環境が乱れる可能性がある.この乱れは、内部 の酸素が消費されシステムが元の状態に戻るまで、出力電 圧の低下を引き起こす.設計段階では、インタラクション の目的に応じて異なる硬さの材料を選択すること、またシ ステムとのインタラクション方法をユーザに示したり、力 をカソードに垂直に向けるための追加の機械的構造を使用 することが重要である.

6.2 エネルギ効率とインタラクションパラダイム

SoilSense は SMFC ベースのデバイスであるため、従来の SMFC と同様のエネルギ収集効率の制限がある. MSP430 のような超低消費電力のマイクロコントローラや Zigbee や LoRa のようにエネルギ効率の高いワイヤレス伝送プロ トコルを利用しても [48], SMFC が提供できる低エネルギ では、これらのシステムの要求を満たすことは難しい. そ のため、システムが自給自足モードで動作することが期待 される場合、インタラクションは断続的に、間隔を開けて 行う必要がある.デザイナは、特定のコンテキストに基づ いてエネルギ消費とインタラクションの頻度を管理する 必要がある.例えば、植物の成長に関連する人間と植物の インタラクションでは、長周期のインタラクションが適し ている [47]. 一方で,他のエネルギ収集デバイスや複数の SMFC モジュールを利用して十分なエネルギを収集できる 場合, SoilSense は高頻度でリアルタイムのインタラクショ ンを可能にする潜在能力を持っている. 今後, より効率的 でアクセス可能なエネルギ収集方法 [5], [49] や,低消費電 力の信号伝送やマイクロプロセッサの効率性の進展 [50] に より, SoilSense は幅広い用途での採用が期待される.

7. 議論と制約

7.1 再現性と耐久性

SoilSense において,SMFCと同様に実験の再現性を担保する上で課題が存在する [5].カソードにかかる力と電 圧変化の関係は確立できるものの,電圧変動から正確な力



図 14 SoilSense のデザインの決定過程

の大きさを予測するための厳密な回帰モデルを構築するこ とは困難である.この制約は、SMFCの製造プロセスの 管理が難しいことや、性能が環境変数に強く依存すること に起因している.しかし、製造の容易さは利点の一つでも ある. 圧力と電圧の相関関係は、異なるカソードサイズや VWC 条件において一貫性を示し、質的な再現性を維持で きる. そのため、インタラクティブシステムの設計では、 電圧の増加率に基づくしきい値設定や、キャリブレーショ ンおよびフィルタリングの導入が推奨される. 土壌は本質 的に柔軟な材料であるため、繰り返し圧縮されると疲労が 生じ、電圧や応答の変動率が低下する可能性がある.本研 究では土壌の疲労試験は行わなかったが、使用したサンプ ルは 200N までの圧力を複数回受けても期待される特性を 維持した、今後の研究では、さまざまな土壌タイプにおけ る臨界圧力を特定し、不可逆的な変化を引き起こす要因を 調査することが求められる.

7.2 エネルギ消費と高度なセンシング評価

SMFC のエネルギ収集効率と電力消費に関する課題は, 関連する研究でも報告されている [5], [7], [51]. 一般的に, 設計者は回帰モデルを用いてシステムの電力消費を推定し, インタラクションパターンを特定する. しかし, SoilSense のエネルギ消費を多様な実環境で評価することが重要で ある. 本研究で使用した概念実証プロトタイプは, センサ モードの実証に焦点を当て, エネルギ収集効率に関する基 礎的な評価を行ったのみである. また, 本研究で示したア プリケーションは, 単純なしきい値ベースの信号検出に依 存しており, SoilSense の力センシングデータが高度な機 械学習モデルでの認識に適用できるかどうかは未検討であ る. これらの課題は, 今後の研究で詳細に調査する必要が ある.

8. 結論

本研究では、SMFC を利用したインタラクティブな力センサである SoilSense を提案した.異なる電極配置および体積含水率(VWC)条件下において、圧力と電圧の関係を

調査し,複数のジェスチャに対応するインタラクションが 可能であることを確認した.また,土壌がインタラクティ ブな力センサとして有効であることを示し,プロトタイプ を用いた概念実証とアプリケーションシナリオを通じて, SoilSense の多様な応用可能性を強調した.本研究は,バ イオ素材をインタラクティブシステムに統合することで, 持続可能な社会の実現に向けた新たな方向性を示すもので ある.

謝辞 本研究の一部は, JST さきがけ(課題番号: JP-MJPR2134)の支援を受けたものである.

参考文献

- Kim, R., Pataranutaporn, P., Forman, J., Lee, S. A., Riedel-Kruse, I. H., Alistar, M., Lazaro Vasquez, E. S., Vega, K., Van Dierendonck, R., Gome, G. et al.: Microbe-HCI: Introduction and Directions for Growth, *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Hu*man Factors in Computing Systems, pp. 1–4 (2021).
- [2] Pataranutaporn, P., Vujic, A., Kong, D. S., Maes, P. and Sra, M.: Living bits: Opportunities and challenges for integrating living microorganisms in human-computer interaction, *Proceedings of the augmented humans international conference*, pp. 1–12 (2020).
- [3] Chang, Z., Zhang, F., Xiong, J., Ma, J., Jin, B. and Zhang, D.: Sensor-free Soil Moisture Sensing Using LoRa Signals, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 6, No. 2 (online), DOI: 10.1145/3534608 (2022).
- [4] Wang, J., Chang, L., Aggarwal, S., Abari, O. and Keshav, S.: Soil moisture sensing with commodity RFID systems, *Proceedings of the 18th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 273–285 (online), DOI: 10.1145/3386901.3388940 (2020).
- [5] Yen, B., Jaliff, L., Gutierrez, L., Sahinidis, P., Bernstein, S., Madden, J., Taylor, S., Josephson, C., Pannuto, P., Shuai, W., Wells, G., Arora, N. and Hester, J.: Soil-Powered Computing: The Engineer's Guide to Practical Soil Microbial Fuel Cell Design, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 7, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3631410 (2024).
- [6] Dziegielowski, J., Metcalfe, B., Villegas-Guzman, P., Martínez-Huitle, C. A., Gorayeb, A., Wenk, J. and Di Lorenzo, M.: Development of a functional stack of soil microbial fuel cells to power a water treatment reac-

tor: From the lab to field trials in North East Brazil, *Applied Energy*, Vol. 278, p. 115680 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115680 (2020).

- [7] Imologie, S., Gbabo, A. and Shekwaga, O.: Performance of a Single Chamber Soil Microbial Fuel Cell at Varied External Resistances for Electric Power Generation, *Journal of Renewable Energy and Environment*, Vol. 3, pp. 53–58 (online), DOI: 10.30501/jree.2016.70092 (2016).
- [8] Jiang, Y.-B., Zhong, W.-H., Han, C. and Deng, H.: Characterization of Electricity Generated by Soil in Microbial Fuel Cells and the Isolation of Soil Source Exoelectrogenic Bacteria, *Frontiers in Microbiology*, Vol. 7 (online), DOI: 10.3389/fmicb.2016.01776 (2016).
- [9] Tucci, M., Cruz Viggi, C., Esteve Núñez, A., Schievano, A., Rabaey, K. and Aulenta, F.: Empowering electroactive microorganisms for soil remediation: Challenges in the bioelectrochemical removal of petroleum hydrocarbons, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 419, p. 130008 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130008 (2021).
- [10] Chang, M., Shen, C., Maheshwari, A., Danielescu, A. and Yao, L.: Patterns and Opportunities for the Design of Human-Plant Interaction, *Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 925–948 (online), DOI: 10.1145/3532106.3533555 (2022).
- [11] Huong Le, T. X., Bechelany, M. and Cretin, M.: Carbon felt based-electrodes for energy and environmental applications: A review, *Carbon*, Vol. 122, pp. 564–591 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.078 (2017).
- [12] Yu, B., Feng, L., He, Y., Yang, L. and Xun, Y.: Effects of anode materials on the performance and anode microbial community of soil microbial fuel cell, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 401, p. 123394 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123394 (2021).
- [13] Lawson, K., Rossi, R., Regan, J. M. and Logan, B. E.: Impact of cathodic electron acceptor on microbial fuel cell internal resistance, *Bioresource Technology*, Vol. 316, p. 123919 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123919 (2020).
- [14] Rismani-Yazdi, H., Carver, S. M., Christy, A. D. and Tuovinen, O. H.: Cathodic limitations in microbial fuel cells: An overview, *Journal of Power Sources*, Vol. 180, No. 2, pp. 683–694 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.02.074 (2008).
- [15] Tucci, M., Cruz Viggi, C., Esteve Núñez, A., Schievano, A., Rabaey, K. and Aulenta, F.: Empowering electroactive microorganisms for soil remediation: Challenges in the bioelectrochemical removal of petroleum hydrocarbons, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 419, p. 130008 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130008 (2021).
- [16] Zhang, D., Ge, Y. and Wang, W.: Study of a terrestrial microbial fuel cell and the effects of its power generation performance by environmental factors, *Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, pp. 445–448 (online), DOI: 10.1109/ICAMechS.2013.6681825 (2013).
- [17] Boneng, C., Cai, W. and Garg, A.: Relationship between bioelectricity and soil-water characteristics of biocharaided plant microbial fuel cell, *Acta Geotechnica*, Vol. 18, p. 3529–3542 (online), DOI: 10.1007/s11440-022-01787-z (2023).

- [18] Dunaj, S. J., Vallino, J. J., Hines, M. E., Gay, M., Kobyljanec, C. and Rooney-Varga, J. N.: Relationships between Soil Organic Matter, Nutrients, Bacterial Community Structure, And the Performance of Microbial Fuel Cells, *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, No. 3, pp. 1914–1922 (online), DOI: 10.1021/es2032532 (2012).
- [19] Kuznetsov, S., Odom, W., Pierce, J. and Paulos, E.: Nurturing natural sensors, *Proceedings of the* 13th International Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 227–236 (online), DOI: 10.1145/2030112.2030144 (2011).
- [20] Kuribayashi, S., Sakamoto, Y. and Tanaka, H.: I/O plant: a tool kit for designing augmented human-plant interactions, CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '07, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2537–2542 (online), DOI: 10.1145/1240866.1241037 (2007).
- [21] Cristiani, P., Gajda, I., Greenman, J., Pizza, F., Bonelli, P. and Ieropoulos, I.: Long Term Feasibility Study of Infield Floating Microbial Fuel Cells for Monitoring Anoxic Wastewater and Energy Harvesting, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 7 (online), DOI: 10.3389/fenrg.2019.00119 (2019).
- [22] Kimura, T. and Kakehi, Y.: MOSS-xels: slow changing pixels using the shape of racomitrium canescens, ACM SIGGRAPH 2014 Posters, SIGGRAPH '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/2614217.2630572 (2014).
- [23] Kurihara, W., Nakano, A. and Hada, H.: Botanical Puppet: Computer Controlled Shameplant, 2017 Nicograph International (NicoInt), pp. 68–71 (online), DOI: 10.1109/NICOInt.2017.16 (2017).
- [24] Volkov, A. G.: A Venus-flytrap-based actuator, *Nature Electronics*, Vol. 4, No. 2, pp. 97–97 (online), DOI: 10.1038/s41928-021-00544-6 (2021).
- [25] Pataranutaporn, P., Vujic, A., Kong, D. S., Maes, P. and Sra, M.: Living Bits: Opportunities and Challenges for Integrating Living Microorganisms in Human-Computer Interaction, *Proceedings of the Augmented Humans International Conference*, AHs '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3384657.3384783 (2020).
- [26] Ofer, N., Bell, F. and Alistar, M.: Designing Direct Interactions with Bioluminescent Algae, *Proceedings of* the 2021 ACM Designing Interactive Systems Conference, DIS '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1230–1241 (online), DOI: 10.1145/3461778.3462090 (2021).
- [27] Bell, F., Chow, D., Choi, H. and Alistar, M.: SCOBY BREASTPLATE: SLOWLY GROWING A MICRO-BIAL INTERFACE, Proceedings of the Seventeenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3569009.3572805 (2023).
- [28] Groutars, E. G., Risseeuw, C. C., Ingham, C., Hamidjaja, R., Elkhuizen, W. S., Pont, S. C. and Karana, E.: Flavorium: An Exploration of Flavobacteria' s Living Aesthetics for Living Color Interfaces, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (オンライン), DOI: 10.1145/3491102.3517713 (2022).

- [29] Lu, J. and Lopes, P.: Integrating Living Organisms in Devices to Implement Care-based Interactions, *Proceed*ings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3526113.3545629 (2022).
- [30] Nakamaru, S., Nakayama, R., Niiyama, R. and Kakehi, Y.: FoamSense: Design of Three Dimensional Soft Sensors with Porous Materials, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 437–447 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126666 (2017).
- [31] Rosenberg, I. and Perlin, K.: The UnMousePad: an interpolating multi-touch force-sensing input pad, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3 (online), DOI: 10.1145/1531326.1531371 (2009).
- [32] Rendl, C., Greindl, P., Haller, M., Zirkl, M., Stadlober, B. and Hartmann, P.: PyzoFlex: printed piezoelectric pressure sensing foil, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software* and *Technology*, UIST '12, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 509–518 (online), DOI: 10.1145/2380116.2380180 (2012).
- [33] Pei, S., Chari, P., Wang, X., Yang, X., Kadambi, A. and Zhang, Y.: ForceSight: Non-Contact Force Sensing with Laser Speckle Imaging, *Proceedings of the* 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3526113.3545622 (2022).
- [34] Sugiura, Y., Inami, M. and Igarashi, T.: A thin stretchable interface for tangential force measurement, *Proceed*ings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '12, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 529–536 (online), DOI: 10.1145/2380116.2380182 (2012).
- [35] Gupta, A., Park, D., Bashar, S., Girerd, C., Bhat, N., Mundhra, S., Morimoto, T. K. and Bharadia, D.: ForceSticker: Wireless, Batteryless, Thin & Flexible Force Sensors, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 7, No. 1 (online), DOI: 10.1145/3580793 (2023).
- [36] Ooms, D., Barati, B., Bruns, M. and van Dongen, T.: From Concern to Care: A Transformative Reflection on Designing-with the Living, *Nordic Human-Computer Interaction Conference*, NordiCHI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3546155.3547285 (2022).
- [37] Gough, P., Forman, J., Pataranutaporn, P., Hepburn, L.-A., Ramirez-Figueroa, C., Cooper, C., Vujic, A., Kong, D. S., Kim, R., Maes, P., Ishii, H., Sra, M. and Ahmadpour, N.: Speculating on Biodesign in the Future Home, *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3411763.3441353 (2021).
- [38] Simeon, I. M., Weig, A. and Freitag, R.: Optimization of soil microbial fuel cell for sustainable bio-electricity production: combined effects of electrode material, electrode spacing, and substrate feeding frequency on power generation and microbial community diversity, *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, Vol. 15, No. 1, p. 124 (online), DOI: 10.1186/s13068-022-02224-9 (2022).
- [39] Lin, F.-T., Kuo, Y.-C., Hsieh, J.-C., Tsai, H.-Y., Liao, Y.-T. and Lee, H. C.: A Self-Powering Wire-

less Environment Monitoring System Using Soil Energy, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, pp. 1–1 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2015.2398845 (2015).

- [40] Azzouz, A. S., Krizek, R. J. and Corotis, R. B.: Regression Analysis of Soil Compressibility, *Soils and Foundations*, Vol. 16, No. 2, pp. 19–29 (online), DOI: https://doi.org/10.3208/sandf1972.16.2_19 (1976).
- [41] Sridharan, A. and Gurtug, Y.: Compressibility characteristics of soils, *Geotechnical and Geological Engineer*ing, Vol. 23, pp. 615–634 (online), DOI: 10.1007/s10706-004-9112-2 (2005).
- [42] Yang, Y., Yan, L., Song, J. and Xu, M.: Optimizing the electrode surface area of sediment microbial fuel cells, *RSC Adv.*, Vol. 8, No. 45, pp. 25319–25324 (2018).
- [43] Song, T., Zaisheng, Y., Zhao, Z.-W. and Jiang, H.: Construction and operation of freshwater sediment microbial fuel cell for electricity generation, *Bioprocess and biosystems engineering*, Vol. 34, pp. 621–7 (online), DOI: 10.1007/s00449-010-0511-x (2011).
- [44] Nilsen, T., Hermann, M., Eriksen, C., Dagfinrud, H., Mowinckel, P. and Kjeken, I.: Grip force and pinch grip in an adult population: Reference values and factors associated with grip force, *Scandinavian journal of occupational therapy*, Vol. 19, pp. 288–96 (online), DOI: 10.3109/11038128.2011.553687 (2011).
- [45] DiDomenico, A. and Nussbaum, M.: Estimation of forces exerted by the fingers using standardised surface electromyography from the forearm, *Ergonomics*, Vol. 51, pp. 858–71 (online), DOI: 10.1080/00140130801915980 (2008).
- [46] Microbes, M.: MudWatt: Grow a Living Fuel Cell. (2024).
- [47] Zhou, J., Barati, B., Wu, J., Scherer, D. and Karana, E.: Digital biofabrication to realize the potentials of plant roots for product design, *Bio-Design and Manufacturing*, Vol. 4, No. 1, pp. 111–122 (online), DOI: 10.1007/s42242-020-00088-2 (2021).
- [48] Osorio-de-la Rosa, E., Vázquez-Castillo, J., Castillo-Atoche, A., Heredia-Lozano, J., Castillo-Atoche, A., Becerra-Nuñez, G. and Barbosa, R.: Arrays of Plant Microbial Fuel Cells for Implementing Self-Sustainable Wireless Sensor Networks, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, No. 2, pp. 1965–1974 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2020.3019986 (2021).
- [49] Xia, C., Min, T., Zhang, D. and Wang, C.: Understanding the Needs of Novice Developers in Creating Self-Powered IoT, *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3613904.3642576 (2024).
- [50] Josephson, C., Shuai, W., Marcano, G., Pannuto, P., Hester, J. and Wells, G.: The Future of Clean Computing May Be Dirty, *GetMobile: Mobile Comp.* and Comm., Vol. 26, No. 3, p. 9–15 (online), DOI: 10.1145/3568113.3568117 (2022).
- [51] Pietrelli, A., Micangeli, A., Ferrara, V. and Raffi, A.: Wireless sensor network powered by a terrestrial microbial fuel cell as a sustainable land monitoring energy system, *Sustainability*, Vol. 6, No. 10, pp. 7263–7275 (2014).